

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО НАВАЛА ЛОПАТОК ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

Аннотация. В работе рассмотрено влияние тангенциального навала лопаток высоконагруженного осевого компрессора на равномерность параметров по высоте проточной части. Предложен метод задания тангенциального навала с помощью кривой Безье четвертого порядка и схема многокритериальной оптимизации. Исследование проводилось в программном комплексе Ansys CFX, оптимизация осуществлялась с помощью программы IOSO NM. Внедрение подобной методики позволит повысить энергетическую эффективность осевого компрессора в частности и газотурбинной установки в целом.

На сегодняшний день перспективным с точки зрения проектирования и доводки проточной части осевого компрессора является трехмерная многокритериальная оптимизация его лопаточного аппарата [1].

В данной работе представлен пример одного из способов повышения эффективности осевого компрессора - изменение тангенциального навала пера лопаток. Применение навала позволяет улучшить структуру течения в концевых областях межлопаточного канала, снизить интенсивность вихря и перетекания в радиальном зазоре, сократить угол отставания на выходе из решетки, перераспределить нагрузку вдоль пера лопатки, сделать поток равномерным по высоте проточной части, а также увеличить запас газодинамической устойчивости ОК в целом, что при двумерном проектировании сделать достаточно сложно [2]. Так же данный способ повышения эффективности позволит снизить потребляемый расход топливного газа ГТУ и повысить эффективный КПД установки.

В качестве объекта исследования выбран высоконагруженный десятиступенчатый осевой компрессор с входным направляющим аппаратом, который характеризуется коэффициентом нагрузки 0,35 по среднему сечению и 0,6 по корневому для первых ступеней.

Построение геометрии лопаточного аппарата ОК производилось по специально разработанной двумерной методике профилирования. В собственном программном коде осуществлялся расчет термодинамических и кинематических параметров потока на входе и выходе из каждого лопаточного венца на семи сечениях по высоте проточной части компрессора, а так же проводилось построения лопаточного аппарата с использованием стандартного распределения толщины NASA 65 [3].

На основании анализа результатов проведенных расчетов исходного варианта ОК установлено наличие отрывных зон в последних ступенях компрессора. Было принято решение о доводке конструкции проточной части путем введения

тангенциального навала лопаток. В ходе данного исследования использовался тангенциальный навал для всех лопаточных венцов компрессора, что связано с желанием оценить влияние формы лопатки на поток в зависимости от местоположения ступени.

Для задания тангенциального навала линия, проходящая через центры масс плоских профилей на каждом радиусе лопатки, описана параметрической кривой Безье четвертого порядка:

$$P(t) = (1-t)^4 P_0 + 4t(1-t)^3 P_1 + 6t^2(1-t)^2 P_2 + 4t^3(1-t) P_3 + t^4 P_4, \quad 0 \leq t \leq 1, \quad (1)$$

где P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 – управляющие точки кривой Безье.

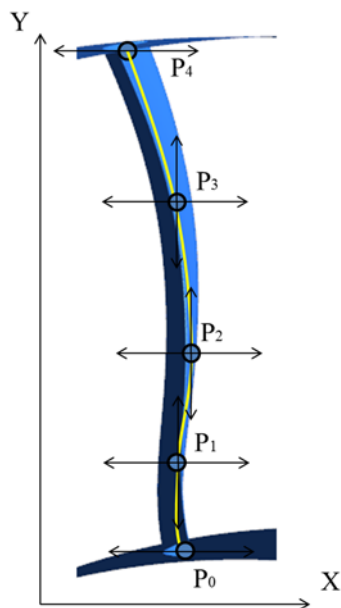


Рис. 1. Схема формирования тангенциального навала

На рис. 1 представлена разработанная схема формирования тангенциального навала. Для оптимизации одного лопаточного венца использовалось 8 переменных.

На основании полученных данных осуществлялось автоматическое построение расчетного домена и конечно-элементное разбиение расчетной модели. Численное исследование течения производилось в программном комплексе Ansys CFX.

Оптимизация лопаточного аппарата осевого компрессора осуществлялась путем интеграции разработанного программного кода профилирования на базе предложенной схемы формирования навала, программного комплекса вычислительной газодинамики Ansys CFX и программы многокритериальной оптимизации IOSO NM.

По предложенному алгоритму в разработанном программном коде за счет варьирования переменными параметрами происходит изменение формы навала и генерация файла геометрии лопатки. Далее осуществляется его автоматическая передача в ПК Ansys Workbench, где расчетная область разбивается на конечно-элементную сетку и происходит численное исследование течения в подготовленной модели проточной части осевого компрессора. Результаты расчетов передаются в программу IOSO NM для анализа и формирования решения о дальнейшем изменении переменных оптимизации. На основе принятого решения происходит задание исходных параметров новой геометрии лопаточного аппарата ОК в собственном программном коде, завершая тем самым полный цикл оптимизации.

По результатам численного исследования осуществлялся выбор средне-массовых параметров на 20 сечениях по высоте межлопаточного канала за каждым венцом. Далее происходило вычисление функции отклонения параметров по высоте лопатки от значения аналогичного параметра на среднем сечении:

$$\Delta\gamma = \frac{\sum \sqrt{(A_i - A_{icp})^2}}{z} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где A – выбранный параметр потока; i – номер сечения по высоте межлопаточного канала ОК; z – количество сечений (в данном случае $z = 20$).

Таким образом осуществлялось определение радиальной неравномерности выбранных параметров за каждым лопаточным венцом компрессора. В качестве критериев оптимизации выбраны минимизация функции отклонения параметров, в данном случае - осевой составляющей абсолютной скорости потока на выходе, плотности потока и энтропии.

В ходе решения задачи оптимизации накладывалось ограничение на погрешность по расходу на входе и выходе из расчетного домена в пределах 5 %. Степень повышения полного давления в ОК сохранялась постоянной в рабочей точке. Варианты ОК с меньшим КПД, чем у исходного варианта компрессора, не учитывались при проведении анализа.

На рис. 2 представлены модели исходного и оптимизированного вариантов ОК.

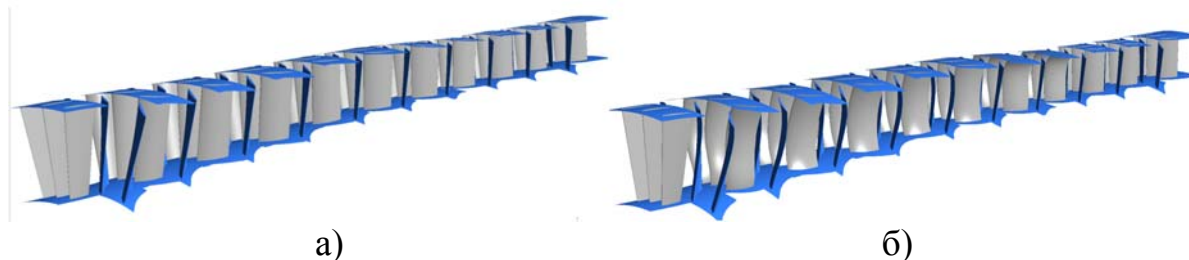


Рис. 2. Модель исходного (а) и оптимизированного компрессора (б)

В результате оптимизации было установлено, что тангенциальный навал первых пяти ступеней позволяет уравновесить поле параметров по высоте проточной части, и уменьшить перетекания рабочего тела в радиальном направлении. За счет этого было достигнуто равномерное распределение параметров потока на входе в шестую ступень, что благоприятно сказалось на обтекании профилей лопаток вблизи меридиональных обводов последних ступеней ОК.

В результате проведенного исследования установлено, что за счет использования навала при вогнутой стороне разряжения пера лопаток рабочих колес и направляющих аппаратов первых пяти ступеней удалось существенно улучшить характер течения в его проточной части и, соответственно, повысить КПД, что объясняется достижением равномерности параметров течения по высоте межлопаточного канала, снижением углов отставания потока на выходе из каждого лопаточного венца и лучшего согласования ступеней компрессора в целом. Также это повлияло на увеличение эффективного КПД установки и снижению потребляемой мощности ОК.

Список использованных источников

1. Блинов В. Л. Выбор параметров расчетной модели при решении задач многокритериальной оптимизации плоских компрессорных решеток / В. Л. Блинов, Ю. М. Бродов, В. А. Седунин, О. В. Комаров // Компрессорная техника и пневматика. 2015. № 1. С. 36–42.
2. Шелковский М. Ю. Параметрическое исследование газодинамических характеристик компрессорных решеток // Авиационно-космическая техника и технология, 2012. № 7 (94). С. 11.
3. Emery J. C., Herrig L. J., Erwin J. R., Felix A. R. Systematic two-dimensional cascade test of NACA 65-series compressor blades at low speeds // NACA Report. 1958. № 1368. P. 1-85.